

日 本 国 特 許 庁

20.11.00

PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

REC'D 19 JAN 2001

WIPO

PCT

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日

Date of Application:

2000年 3月 3日

JP00/8155

出 願 番 号

Application Number:

特願2000-058964

4

出 願 人

Applicant (s):

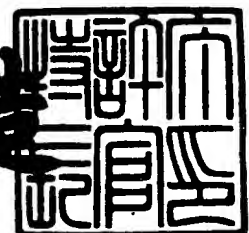
松下電器産業株式会社

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

2000年12月22日

特許庁長官
Commissioner,
Patent Office

及 川 耕 造



出証番号 出証特2000-3105571

【書類名】	特許願	
【整理番号】	2033820016	
【提出日】	平成12年 3月 3日	
【あて先】	特許庁長官	殿
【国際特許分類】	H01L 21/28	
	H01L 29/16	
【発明者】		
【住所又は居所】	大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地	松下電器産業株
	式会社内	
【氏名】	横川 俊哉	
【発明者】		
【住所又は居所】	大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地	松下電器産業株
	式会社内	
【氏名】	高橋 邦方	
【発明者】		
【住所又は居所】	大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地	松下電器産業株
	式会社内	
【氏名】	楠本 修	
【発明者】		
【住所又は居所】	大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地	松下電器産業株
	式会社内	
【氏名】	北畠 真	
【発明者】		
【住所又は居所】	大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地	松下電器産業株
	式会社内	
【氏名】	上野山 雄	
【特許出願人】		
【識別番号】	000005821	
【氏名又は名称】	松下電器産業株式会社	

【代理人】

【識別番号】 100077931

【弁理士】

【氏名又は名称】 前田 弘

【選任した代理人】

【識別番号】 100094134

【弁理士】

【氏名又は名称】 小山 廣毅

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 014409

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9601026

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 半導体装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 基板上に能動素子の一部として機能する活性領域を設けてなる半導体装置において、

上記活性領域は、

上記基板の上に設けられ、キャリア走行領域として機能する少なくとも 1 つの第 1 の半導体層と、

上記第 1 の半導体層よりも高濃度のキャリア用不純物を含み上記第 1 の半導体層よりも膜厚が薄く量子効果による上記第 1 の半導体層へのキャリアの浸みだしが可能な少なくとも 1 つの第 2 の半導体層とを積層して構成されていることを特徴とする半導体装置。

【請求項 2】 請求項 1 記載の半導体装置において、

上記第 1 及び第 2 の半導体層は、各々複数個設けられ、かつ交互に積層されていることを特徴とする半導体装置。

【請求項 3】 請求項 1 又は 2 記載の半導体装置において、

上記第 1 の半導体層におけるキャリア用不純物濃度は、 $1 \times 10^{17} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ 未満であり、

上記第 2 の半導体層におけるキャリア用不純物濃度は、 $10^{17} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上であることを特徴とする半導体装置。

【請求項 4】 請求項 1～3 のうちいずれか 1 つに記載の半導体装置において、

上記基板及び活性領域は、SiC、GaN 及び GaAs のうちから選ばれるいずれか 1 つの材料により構成されていることを特徴とする半導体装置。

【請求項 5】 請求項 1～4 のうちいずれか 1 つに記載の半導体装置において、

上記活性領域中の第 1 及び第 2 の半導体層は、互いに共通の材料により構成されていることを特徴とする半導体装置。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1 】

【発明の属する技術分野】

本発明は、高耐圧性を有する半導体パワーデバイスに特に適した活性領域の構造に関する。

【 0 0 0 2 】

【従来の技術】

近年、高周波特性、発光特性、耐圧特性などの特殊な機能をもった半導体デバイスを実現するための新しい半導体材料（いわゆる半絶縁性材料を含む）の開発が活発に行なわれている。半導体材料の中でも、例えば炭化珪素（SiC）、窒化ガリウム（GaN）、砒化ガリウム（GaAs）などのイントリンシック状態でいわゆる半絶縁性を有するものは、代表的な半導体材料である珪素（Si）に比べて高硬度で薬品にも犯されにくく、バンドギャップが大きい半導体であることから、大きな耐圧性を利用した次世代のパワーデバイスや高周波デバイス、高温動作デバイス等へ応用されることが期待される材料である。

【 0 0 0 3 】

これらのバンドギャップの広い半導体材料を利用した半導体パワーデバイスとしては、例えば、高耐圧ショットキーダイオード、MESFET（Metal Semiconductor-電界効果型トランジスタ）、MISFET（Metal Insulator Semiconductor-電界効果型トランジスタ）などがある。

【 0 0 0 4 】

ここで、半導体パワーデバイスの従来例としてショットキーダイオードとMISFETとを例にあげる。

【 0 0 0 5 】

図11は、従来の炭化珪素（SiC）を用いたショットキーダイオードの概略的な構造を示す断面図である。同図において、101はn型キャリアである高濃度の窒素（N）がドーピングされた厚さ約100 μ mのn+ SiC基板、102はn型キャリアである低濃度の窒素（N）がドーピングされた厚さ約10 μ mのn- SiC層、103はNi合金からなるショットキー電極、104はNi合金からなるオーミック電極、105はSiO₂ からなるガードリングをそれぞれ示す。この

ダイオードにおいて、ショットキー電極 1 0 3 とオーミック電極 1 0 4 との間にショットキー電極 1 0 3 の方が高くなるように電圧を印加する（順方向電圧）と、ショットキー電極 1 0 3 とオーミック電極 1 0 4 との間に電流が流れ、ショットキー電極 1 0 3 とオーミック電極 1 0 4 との間にオーミック電極 1 0 4 の方が高くなるように電圧を印加する（逆方向電圧）と、ショットキー電極 1 0 3 とオーミック電極 1 0 4 との間に電流が流れない。つまり、このショットキーダイオードは、順方向電圧に応じて電流を流すが、逆方向電圧に対しては電流を遮断するという整流特性を有する。

【 0 0 0 6 】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上記従来のショットキーダイオードにおいては、以下のような不具合があった。

【 0 0 0 7 】

上記従来のショットキーダイオードにおける逆方向電圧に対する絶縁耐圧性は、 n -SiC 層 1 0 2 のドーピング濃度に強く依存している。例えばショットキーダイオードの絶縁耐圧を向上するためには、ショットキー電極 1 0 3 と接触する n -SiC 層 1 0 2 のドーピング濃度を低く抑える必要がある。しかし、ドーピング濃度を下げると n -SiC 層 1 0 2 の抵抗率が上昇するため、順方向電圧を印加した時のオン抵抗が高くなる。その結果として消費電力の上昇が生じる。このトレードオフのために、高耐圧化と低抵抗化とを同時に実現するのは困難であった。

【 0 0 0 8 】

上述のような不具合は、ショットキーダイオードだけでなく、MESFET や MISFET においても生じることがわかっている。

【 0 0 0 9 】

本発明の目的は、上記従来のパワーデバイスが有するようなトレードオフを解決するための新たな構造を創生することにより、高耐圧でしかもオン抵抗の低い能動素子を実現することにある。

【 0 0 1 0 】

【課題を解決するための手段】

本発明の半導体装置は、基板上に能動素子の一部として機能する活性領域を設けてなる半導体装置において、上記活性領域は、上記基板の上に設けられ、キャリア走行領域として機能する少なくとも1つの第1の半導体層と、上記第1の半導体層よりも高濃度のキャリア用不純物を含み上記第1の半導体層よりも膜厚が薄く量子効果による上記第1の半導体層へのキャリアの浸みだしが可能な少なくとも1つの第2の半導体層とを積層して構成されている。

【0011】

この構造により、活性領域のポテンシャルが高められ、キャリアが走行する状態において、量子効果によって第2の半導体層に量子準位が生じ、第1の半導体層と第2の半導体層との間のポテンシャル障壁はある程度のなめらかな傾斜を形成するとともに、ポテンシャル中に局在する電子の波動関数はある程度の広がりを持つようになる。その結果、キャリアが第2の半導体層だけでなく第1の半導体層にも存在するような分布状態となる。そして、第1の半導体層においては、不純物イオン散乱は少なくなるために特に高い電子移動度が得られる。

【0012】

一方、活性領域全体が空乏化された状態においては、活性領域にはキャリアが存在しなくなるので、不純物濃度の低い第1の半導体層によって耐圧性が規定され、活性領域全体において高い耐圧値が得られることになる。すなわち、半導体装置中のダイオードやトランジスタ等の能動素子の低抵抗化と高耐圧化とを同時に実現することが可能になる。

【0013】

上記第1及び第2の半導体層を、各々複数個設け、かつ交互に積層することにより、より確実に低抵抗値と高耐圧性とを発揮することができる。

【0014】

上記第1の半導体層におけるキャリア用不純物濃度は、 $1 \times 10^{17} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ 未満であり、上記第2の半導体層におけるキャリア用不純物濃度は、 $10^{17} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上であることが好ましい。

【0015】

上記基板及び活性領域を、SiC、GaN及びGaAsのうちから選ばれるいずれか1つの材料により構成することにより、バンドギャップの広い材料を利用したパワーデバイスに適した構造を有する半導体装置が得られる。

【0016】

上記活性領域中の第1及び第2の半導体層を互いに共通の材料により構成することにより、第1の半導体層と第2の半導体層との間のポテンシャル障壁がよりなめらかな傾斜を持つようになるので、キャリアを活性領域の第1及び第2の半導体層に亘って分布させることが容易となる。

【0017】

【発明の実施の形態】

図1は、本発明の各実施形態において用いられる薄膜形成用の結晶成長装置の構造を概略的に示す図である。

【0018】

同図に示すように、この縦型結晶成長装置は、チャンバー1の中に、基板3を載置するためのカーボン製サセプタ4と、サセプタ4を支持するための支持軸5と、チャンバー1の石英管2と、石英管2の外側に巻き付けられ、サセプタ4を高周波電流により誘導加熱するためのコイル6とを備えている。石英管2は、二重石英管などからなり冷却水を流せるように構成されている。また、チャンバー1に供給する各種ガスのボンベ等を配置したガス供給システム8と、チャンバー1から各種ガスを排出するための真空ポンプ等を配置したガス排出システム15とが設けられている。ガス供給システム8とチャンバー1とは、原料ガスを供給するための原料ガス供給管7と、水素等の希釈ガスを供給するための希釈ガス供給管9と、不活性ガスやドーピングガスなどの添加ガスを供給するための添加ガス供給管12とによって接続されており、原料ガス供給管7と希釈ガス供給管9とは、途中で合流してチャンバー1に接続されている。そして、原料ガス供給管7及び希釈ガス供給管9の合流前の部位には、それぞれガス流量を調整するための流量計10、11が介設されている。また、ガス排出システム15とチャンバー1とは排気管14によって接続され、排気管14には、排出されるガスの流量によってチャンバー1内の圧力を調節するための圧力調整バルブ16が介設され

ている。

【 0 0 1 9 】

ここで、この結晶成長装置の特徴は、添加ガス供給管 1 2 にパルスバルブ 2 0 が介設されていることと、チャンバー 1 内には添加ガス供給管 1 2 の先端から直径が約 2 c m のガス導入管 1 3 が延び、このガス導入管 1 3 の先端が基板 3 の上面よりも約 5 c m 上方に位置する部位で開口していることである。

【 0 0 2 0 】

サセプタ 4 には、高温に加熱された時に脱ガスが起こらないように厚みが約 1 0 0 μ m の S i C 膜がコーティングされている。ただし、この S i C 膜の厚みは脱ガスの発生を防止できる厚みよりも厚ければいくらかでもよい。

【 0 0 2 1 】

ガス供給システム 8 から原料ガス供給管 7 を通って供給される原料ガスと、希釈ガス供給管 9 を通って供給される希釈ガスとは合流した後、チャンバー 1 の上部からチャンバー 1 内に導入される。そのとき、原料ガス及び希釈ガスの流量は、各流量計 1 0 , 1 1 によって調整される。

【 0 0 2 2 】

一方、添加ガス供給管 1 2 を経て供給されるドーピングガスや不活性ガスなどの添加ガスは、パルスバルブ 2 0 の周期的な開閉に応じてパルス状に基板 3 の表面に供給される。このパルスバルブ 2 0 が開いている期間（パルス幅）及び閉じている期間（パルスとパルスの間隔）は任意に設定することができ、例えばパルスバルブ 2 0 が開いている期間が 1 0 0 μ s 、閉じている期間が 4 m s の場合には、1 秒間におよそ 2 4 0 回の開閉が繰り返されることになる。ガス導入管 1 3 の先端と基板 3 との距離は接近している方が好ましいが、接近しすぎると狭い範囲にしかガスをパルス状で供給する効果が発揮できないので 5 c m 程度の間隔をもっていることが好ましい。

【 0 0 2 3 】

そして、原料ガス、希釈ガス及び添加ガスは、排気管 1 4 を通ってガス排気システム 1 5 により外部に排気される。

【 0 0 2 4 】

また、図2は、パルスバルブの開く期間であるオン期間（パルス幅）を変化させたときのn型ドーパ層のピークキャリア濃度（atoms・cm⁻³）と、キャリア移動度（cm²/Vs）との変化を示す図である。このとき、ガス供給システム8内におけるガスボンベの減圧器の二次側圧力は78400Pa（0.8kgf/cm²）で一定とした。そして、パルスバルブ20が開いているオン期間を変化させ、パルスバルブ20が閉じているオフ期間（パルスとパルスとの間隔）を一定の4msとしている。

【0025】

同図に示すように、n型ドーパ層のピークキャリア濃度はパルスバルブ20が開いているオン期間を変化させることにより制御可能であることが分かる。また、この結果から、オフ期間を変化させても、ピークキャリア濃度を調整しうることがわかる。特に、オフ期間（パルスとパルスとの間隔）を一定とした場合、パルスバルブのオン期間（パルス幅）を95μsと110μsとの間で変化させるだけで、ピークキャリア濃度を5×10¹⁶atoms・cm⁻³から約1×10¹⁹atoms・cm⁻³まで大きく変化させることができる。

【0026】

（第1の実施形態）

第1の実施形態として、図1に示す結晶成長装置を用い、図1中の基板3として（0001）面（C面）にオフ角度が設けられた主面を有する六方晶系の単結晶炭化珪素基板（6H-SiC基板）を用い、この基板3の上に六方晶炭化珪素（SiC）からなるn型ドーパ層をホモエピタキシャル成長させる方法について説明する。図3（a）～（c）は、本実施形態の半導体膜の成長方法を示す断面図である。

【0027】

図3（a）に示すように、基板3（6H-SiC基板）の主面は、（0001）面（C面）から[11-20]方向に3.5°傾いた面（（0001）オフ面）であり、かつ、表面にSi原子が並ぶn型Si面である。基板3の直径は25mmである。まず、流量5（l/min）の酸素によってバブリングされた水蒸気雰囲気中で、基板3を1100℃で3時間ほど熱酸化し、表面に厚みが約40

n mの熱酸化膜を形成した後、バッファード弗酸（弗酸：フッ化アンモニウム水溶液＝1：7）により、その熱酸化膜を除去する。サセプタ4に表面の熱酸化膜が除去された基板3を設置し、チャンバー1を 10^{-6} Pa程度（ $\approx 10^{-8}$ Torr）の真空度になるまで減圧する。

【0028】

次に、図3（b）に示す工程で、ガス供給システム8から、希釈ガスとして流量2（l/min）の水素ガスと流量1（l/min）のアルゴンガスとを供給し、チャンバー1内の圧力を0.0933 MPa（700 Torr）とする。チャンバー1内の圧力は圧力調整バルブ16の開度により制御されている。この流量を維持しながら、誘導加熱装置を用いて、コイル6に、20.0 kHz、20 kWの高周波電力を印加して、サセプタ4を加熱する。基板3の温度は、一定温度である約1600℃に制御した。水素ガス及びアルゴンガスの流量は上述の一定値に保持しながら、原料ガスとして流量が2（ml/min）のプロパンガスと、流量が3（ml/min）のシランガスとをチャンバー1内に導入する。原料ガスは流量50（ml/min）の水素ガスで希釈されている。そして、プロパンガスとシランガスを誘導加熱されたサセプタ4上の基板3（6H-SiC基板）に供給することにより、基板3の（0001）オフ面である主面の上に、アンドープの6H-SiC単結晶からなる厚さ約100 nmのアンドープ層22（低濃度ドーピング層）をエピタキシャル成長させる。このとき、窒素ガスなどを使用しなくても、残留ガスなどによって窒素などのキャリア用不純物がある程度導入されることがあるので、本実施形態及び後述する各実施形態においては、製造工程上意識的に窒素を導入して形成されたものではないという意味で、「アンドープ層」という文言を用いることとする。

【0029】

引き続いて、チャンバー1内で、原料ガス及び希釈ガスを供給しながら、n型ドーピングガスである窒素をパルス状に供給することにより、アンドープ層22の上に厚さ約5 nmのn型ドーピング層23（高濃度ドーピング層）を形成する。このとき、原料ガス及び希釈ガスを供給しながら、パルスバルブ20を繰り返し開閉することによって、ドーピングガスを、導入管13からチャンバー1内の基板3の

直上にパルス状に供給することができる。本実施形態においては、パルスバルブ 20 が開いている期間（パルス幅）を $102\ \mu\text{s}$ 、パルスバルブ 20 が閉じている期間（パルスとパルスの間隔）を $4\ \text{ms}$ としている。そして、パルスバルブ 20 の開閉を繰り返してドーピングガスを供給しながら n 型ドーブ層 23 を形成する。このとき、厚み $5\ \text{nm}$ の n 型ドーブ層 23 をエピタキシャル成長させるのに要する時間は約 $15\ \text{sec}$ である。

【0030】

次に、図 3（c）に示す工程で、パルスバルブ 20 を閉じた状態にして窒素（N）を供給しないで原料ガスの供給のみによるアンドープ層 22 の形成と、原料ガスを供給しながら同時にパルスバルブ 20 を開閉して窒素（N）を導入することによる n 型ドーブ層 23 の形成とをさらに繰り返すことにより、アンドープ層 22 と n 型ドーブ層 23 とを交互に積層してなる活性領域 30 を形成する。

【0031】

すなわち、活性領域 30 は、第 1 の半導体層であるアンドープ層 22 と、アンドープ層よりも厚みが小さく、アンドープ層 22（第 1 の半導体層）よりも高濃度のキャリア用不純物を含み量子効果によるアンドープ層 22 へのキャリアの浸みだしが可能な程度に薄い第 2 の半導体層である n 型ドーブ層 23 とを交互に積層して構成されている。

【0032】

図 4 は、本実施形態において形成された活性領域 30 の深さ方向のドーパント濃度分布を示す図であって、上述のように、n 型ドーブ層 23 を形成する際のパルスバルブ 20 が開いている期間（パルス幅）を $102\ \mu\text{s}$ 、閉じている期間（パルスとパルスとの間隔）を $4\ \text{ms}$ としている。同図の濃度プロファイルは、二次イオン質量分析装置（SIMS）を用いて測定した結果得られたものである。同図において、横軸は基板の最上面からの深さ（ μm ）を表し、縦軸はドーパントである窒素の濃度（ $\text{atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）を表している。同図に示すように、本実施形態の方法で形成された各 n 型ドーブ層 23 における窒素（N）の濃度はほぼ均一であり（約 $1 \times 10^{18} \text{atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ ）、しかもアンドープ層 22 から n 型ドーブ層 23 に遷移する領域、n 型ドーブ層 23 からアンドープ層 22 に遷移する

領域のいずれにおいても、極めて急峻な不純物濃度の変化を示している。なお、図4のデータは、パルスバルブ20が開いている期間（パルス幅）を $102\mu s$ として、キャリアガスとして窒素ガスを流しながら形成したドーパ層について得られたデータである。そのために図4に示される窒素のピーク濃度は $1 \times 10^{18} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ 程度であるが、図2に示すように、パルスバルブ20が開いている期間（パルス幅）を $110\mu s$ にすることにより、窒素のピーク濃度を $1 \times 10^{19} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ 程度に高めることが可能である。また、キャリアガスとしての窒素ガスを流せば、アンドープ層の窒素濃度を $1 \times 10^{16} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ 程度に制御することも容易である。キャリアガスを流してアンドープ層にもある程度の流量の窒素を供給することにより、アンドープ層の窒素濃度を安定して一定濃度に制御できる利点もある。

【0033】

図5(a), (b)は、本実施形態における基本構造を有する活性領域30の深さ方向におけるn型不純物である窒素の濃度プロファイルとキャリア分布との関係を模式的に示す図、及び活性領域30の深さ方向に沿った伝導帯端の形状を示す部分バンド図である。ただし、図5(a), (b)は、キャリアガスとして窒素を使用せずにアンドープ層22（低濃度ドーパ層）における窒素の濃度を $1 \times 10^{15} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ とし、パルスバルブのパルス幅を $102\mu s$ 程度に制御してn型ドーパ層23（高濃度ドーパ層）の窒素の濃度を $1 \times 10^{18} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ とした場合について作成したモデルである。

【0034】

図4に示すデータから、n型ドーパ層23の不純物濃度プロファイルを図5(a)に示すようにアンドープ層22の下地に対してほぼ δ 関数的な形状であるとする。つまり、n型ドーパ層23をいわゆる δ ドーパ層としている。この場合、nドーパ層23の厚みが 5nm 程度と薄いことから、この活性領域30のポテンシャルが高められ、キャリアが走行する状態においては、n型ドーパ層23において量子効果に起因した量子準位が生じ、このポテンシャル障壁はある程度のなめらかな傾斜を有するとともに、ポテンシャル中に局在する電子の波動関数はある程度の広がりを持つようになる。その結果、図中破線で表されるように、キャ

リアがn型ドーブ層23だけでなくアンドーブ層22にも存在するような分布状態となる。そのとき、アンドーブ層22における不純物イオン散乱は少なくなるために、アンドーブ層22においては特に高い電子移動度が得られる。ただし、活性領域30全体が空乏化された状態においては、当然のことながらアンドーブ層22及びn型ドーブ層23にはキャリアが存在しない。

【0035】

また、図5(b)に示すように、活性領域30全体の伝導帯端は、図中破線で示すn型ドーブ層23の伝導帯端とアンドーブ層22の伝導帯端とを接続する形状になる。なお、n型ドーブ層23の不純物濃度は、その伝導帯端がフェルミレベル E_f よりも下方になる程度に濃くするのが一般的であるが、n型ドーブ層23の不純物濃度は必ずしもそれほど濃くなくてもよい。

【0036】

そして、このような構造を有する活性領域30を利用することにより、後述の各実施形態に示すように、高性能のデバイスを得ることができる。ここで、活性領域30において、アンドーブ層22とn型ドーブ層23とがキャリア走行領域として機能することについては、以下の各実施形態において説明する。

【0037】

なお、本実施形態においては窒素を用いてn型のドーブ層を形成したが、n型の伝導性を示すドーパントとして他の元素（例えばリン(P)、砒素(As)など)を含むドーピングガスを用いても差し支えない。

【0038】

また、本実施形態においてはn型ドーブ層を形成したが、p型の伝導性を生じるボロン(B)、アルミニウム(Al)、ガリウム(Ga)等の原子を含むドーピングガスを用いれば、各遷移領域で極めて急峻な濃度分布をもつp型のドーブ層が形成されることはいうまでもない。

【0039】

また、本実施形態においてはアンドーブ層の上にn型ドーブ層（高濃度ドーブ層）を形成したが、アンドーブ層の代わりに、パルスバルブを開いて形成した低濃度のn型ドーブ層を用いてもよい。

【 0 0 4 0 】

また、本実施形態においては、炭化珪素基板（SiC基板）の上にエピタキシャル成長法によってアンドープ層（低濃度ドーピング層）とn型ドーピング層（高濃度ドーピング層）とを積層した活性領域を設けた構造について述べたが、本発明の活性領域の構造をSiC以外の材料からなる基板上に設けてもよい。特に、GaAs、GaNなどの基板は、いわゆる半絶縁性材料と呼ばれるほどバンドギャップが広いことから、本発明を適用することによって高耐圧のデバイスを形成しうる利点がある。

【 0 0 4 1 】

また、本実施形態においては、基材上の薄膜成長方法として誘導加熱を用いたCVD方法について述べたが、ガスを用いて基材上に薄膜を成長させるのであればプラズマCVD法、光照射CVD法、電子照射CVD法のいずれかの作用によって上記基材上に薄膜を成長する場合にも本発明の薄膜成長方法が有効であることはいうまでもない。

【 0 0 4 2 】

さらに、本発明は、CVD法だけでなくスパッタリング法、蒸着法、MBE法などの他の方法を用いて、低濃度ドーピング層（アンドープ層を含む）と、それよりも厚みが小さく、量子効果による低濃度ドーピング層へのキャリアの浸みだしが可能な程度に厚みの薄い（材料によって異なるが、SiC基板では20nm程度以下）高濃度ドーピング層とを積層したものにも適用することができる。そして、低濃度ドーピング層（アンドープ層を含む）の厚みは、100nm程度に厚くてもよいし、量子効果が生じる程度に薄くてもよい。この厚みは、目的とする能動素子（ダイオード、トランジスタなど）の種類や目的に応じて適宜選択することができる。

【 0 0 4 3 】

次に、本実施形態の方法で形成された活性領域30を応用した各種デバイスに関する実施形態について説明する。

【 0 0 4 4 】

（第2の実施形態）

まず、第1の実施形態の活性領域の構造を利用したショットキーダイオードに

関する第2の実施形態について説明する。図6は、第2の実施形態に係るパワー半導体デバイスであるショットキーダイオードの概略的な構造を示す断面図である。

【0045】

同図に示すように、(0001)オフ面を主面とするn型の6H-SiC基板である基板3の主面上には、上記第1の実施形態で説明した方法により形成されたアンドープ層22（低濃度ドーピング層）とn型ドーピング層23（高濃度ドーピング層）とを交互に50層ずつ積層した活性領域30が設けられている。ここで、基板3の厚さは約100 μm で、基板3中の窒素濃度は約 $1 \times 10^{18} \text{atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ である。n型ドーピング層23の厚さは約5nmで、n型ドーピング層23中の窒素のピーク濃度は $1 \times 10^{18} \text{atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ である。アンドープ層22の厚さは約100nmで、アンドープ層22中の窒素濃度は約 $1 \times 10^{15} \text{atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ である。活性領域30の最上部はアンドープ層22によって構成されており、活性領域30の最上部のアンドープ層22の上には、シリコン酸化膜からなるガードリング31と、ガードリング31に設けられた開口部において活性領域30の最上部のアンドープ層22にショットキー接触するNi合金からなるショットキー電極32とが設けられている。また、基板3の裏面には、基板3にオーミック接触するNi合金からなるオーミック電極33が設けられている。

【0046】

図6に示すショットキーダイオードの構造は、以下の手順により形成される。まず、高濃度に窒素がドーピングされたSiC基板である基板3を図1に示す結晶装置内に設置し、第1の実施形態で説明したCVDを行なって、基板3の上に、厚み約100nmのアンドープ層22と厚み約5nmのn型ドーピング層23とを交互にエピタキシャル成長させて、活性領域30を形成する。その後、基板上にシリコン酸化膜を形成した後、その一部を開口してガードリング31を形成する。次に、基板3の裏面にNi合金からなるオーミック電極33を形成し、基板上のガードリング31の開口領域の上に、Ni合金からなるショットキー電極32を形成する。

【0047】

図 7 (a 1) ~ (c 2) は、本実施形態のショットキーダイオードと図 1 1 に示す従来のショットキーダイオードについて、バイアスの変化による伝導帯端の形状の変化を示すエネルギーバンド図である。ここで、図 7 (a 1), (b 1), (c 1) は本実施形態のショットキーダイオードの活性領域の伝導帯端を、図 7 (a 2), (b 2), (c 2) は従来のショットキーダイオードの n -SiC 層の伝導帯端をそれぞれ示す。また、図 7 (a 1), (a 2) は、ショットキー電極とオーミック電極との間に電圧を印加しないとき (0 バイアス)、図 7 (b 1), (b 2) は、ショットキー電極とオーミック電極との間にショットキー電極の方が高くなるように電圧を印加した場合 (順バイアス)、図 7 (c 1), (c 2) は、ショットキー電極とオーミック電極との間にオーミック電極の方が高くなるように電圧を印加した場合 (逆バイアス) の伝導帯端の形状をそれぞれ示している。なお、オーミック電極 3 3 と活性領域 3 0 との接触状態はバイアスの変化によって本質的に変化するものではないので、図示を省略している。また、本実施形態では、キャリアとして電子が走行する n 型半導体層を設けた場合について説明しているので、価電子帯端の形状についても図示を省略している。

【0048】

図 7 (a 1), (a 2) に示すように、本実施形態、従来のショットキーダイオード共に、自然状態においては、活性領域の最上部とショットキー電極との間、 n -SiC 層とショットキー電極との間に、それぞれ高いショットキー障壁 (約 1 eV) が形成されている。

【0049】

そして、図 7 (b 1) に示すように、本実施形態のショットキーダイオードに順バイアスが印加されると、活性領域 3 0 のポテンシャルが高められる、つまり活性領域 3 0 全体の伝導帯端のエネルギーレベルが上昇する。そして、活性領域 3 0 中のアンドープ層 2 2 において図 5 (a) に示すようなキャリアの分布が生じるので、活性領域 3 0 からショットキー電極 3 2 に電流が流れる。つまり、活性領域 3 0 の n 型ドーパ層だけでなくアンドープ層 2 2 がキャリア走行領域として機能することになる。このとき、アンドープ層 2 2 には図 5 (a) に示すようなキャリアの分布が生じているものの不純物濃度が低いので、アンドープ層 2 2

においては不純物散乱が極めて低減される。ここで、一般に半導体のコンダクタンス（抵抗値の逆数）は、電界とキャリア濃度とキャリア移動度との積に比例するが、キャリアが浸みだした領域ではキャリア移動度が上昇する。したがって、本実施形態のショットキーダイオードでは、活性領域 3 0 全体としての抵抗値を小さく維持することができ、低消費電力、大電流を実現することができる。

【0050】

一方、図 7（b 2）に示すように、従来のショットキーダイオードに順バイアスが印加されると、 n^+ SiC 基板からショットキー電極に電流が流れるが、そのときに n^- SiC 層という電気抵抗の大きい領域を通過する必要があるため、大きな消費電力が必要となる。

【0051】

また、図 7（c 1）に示すように、本実施形態のショットキーダイオードに逆バイアスが印加されると、活性領域 3 0 における伝導帯端のエネルギーレベル全体が低くなる。ここで、耐圧値は、逆バイアス時における空乏層に印加される電界によって規定される。本実施形態のショットキーダイオードでは、 n 型ドープ層 2 3 の厚みが極めて薄いことから、活性領域 3 0 全体の空乏層幅は n 型ドープ層 2 2 の不純物濃度に依存して決定されたと考えてよい。その場合、不純物濃度が低いほど伝導帯端の傾斜が緩やかになるので、不純物濃度が低いほど空乏層幅は当然広くなる。よって、本実施形態のショットキーダイオードにおいては、大きな耐圧値が得られることになる。

【0052】

一方、図 7（c 2）に示すように、従来のショットキーダイオードでは、 n^- SiC 層の空乏層幅は、 n^- SiC 層の不純物濃度に応じて変化するので、 n^- SiC 層の不純物濃度を調整することによって抵抗値と耐圧値とを制御することは可能である。しかしながら、抵抗値を下げるために n^- SiC 層の不純物濃度を上げると空乏層幅が狭くなって耐圧値が低下する一方、 n^- SiC 層の不純物濃度を低減すると抵抗値が増大するというトレードオフが存在する。すなわち、従来のショットキーダイオードによっては、パワーデバイスとして望まれる低抵抗性（低消費電力）及び高耐圧値とを同時に実現することが困難である。

【 0 0 5 3 】

それに対し、本実施形態のショットキーデバイスにおいては、順バイアス状態では、キャリアがn型ドーブ層23（高濃度ドーブ層）からアンドーブ層22（低濃度ドーブ層）に亘って分布するのを利用して、大きな抵抗を受けることなく容易に大電流を流すことができる。一方、逆バイアス状態ではキャリアがアンドーブ層22には存在しないので、高耐圧値を得ることになる。つまり、順バイアス状態と逆バイアス状態とではキャリアの分布状態が相異なることに着目して、従来のショットキーダイオードにおいて存在していた低抵抗性と高耐圧性というトレードオフを解消することができるのである。

【 0 0 5 4 】

例えば、本実施形態では実測値で逆バイアスに対して1000V程度の高耐圧値を有するショットキーダイオードが得られた。また、本実施形態のショットキーダイオードのオン抵抗は、実測値で約 $1 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}^2$ であり、極めて低い抵抗値を示している。

【 0 0 5 5 】

（第3の実施形態）

次に、第2の実施形態とは基本的に異なる構造を有するショットキーダイオードの別例に関する第3の実施形態について説明する。図8は、第3の実施形態に係るパワー半導体デバイスであるショットキーダイオードの概略的な構造を示す断面図である。

【 0 0 5 6 】

同図に示すように、(0001)オフ面を主面とするn型の6H-SiC基板である基板3の主面上には、第1の実施形態で説明した方法と基本的に同じ方法により形成されたアンドーブ層22（低濃度ドーブ層）とn型ドーブ層23（高濃度ドーブ層）とを交互に50層ずつ積層した活性領域30が設けられている。ここで、基板3の厚さは約100 μm で、基板3には不純物がドーブされておらずほぼ半絶縁性状態となっている。n型ドーブ層23の厚さは約2nmで、n型ドーブ層23中の窒素のピーク濃度は $1 \times 10^{18} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ である。アンドーブ層22の厚さは約100nmで、アンドーブ層22中の窒素濃度は約 1×1

$0.15 \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ である。

【0057】

ここで、本実施形態においては、活性領域30の上ではなく側方にショットキー電極35が設けられている。すなわち、活性領域30を掘込んで基板3に達する溝が形成され、この溝の側面に活性領域30にショットキー接触するNi合金からなるショットキー電極35が設けられている。また、活性領域30を挟んでショットキー電極35に対向するように引き出し用ドープ層36が形成されている。この引き出し用ドープ層36は活性領域30及び基板3の一部に窒素のイオン注入を行なうことにより形成されたもので、引き出し用ドープ層36における窒素の濃度は、約 $1 \times 10^{18} \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ である。そして、引き出し用ドープ層36の上には、引き出し用ドープ層36にオーミック接触するNi合金からなるオーミック電極37が設けられている。ショットキー電極35と引き出し用ドープ層36との間隔は約 $10 \mu\text{m}$ である。

【0058】

なお、活性領域30のn型ドープ層23とショットキー電極35とは、後に説明する理由から実質的にオーミック接触するわけではない。

【0059】

図8に示すショットキーダイオードの構造は、以下の手順により形成される。まず、半絶縁性のSiC基板である基板3を図1に示す結晶装置内に設置し、第1の実施形態で説明したCVDを行なって、基板3の上に、厚み約 100 nm のp型ドープ層22と厚み約 2 nm のn型ドープ層23とを交互にエピタキシャル成長させて、活性領域30を形成する。次に、活性領域30及び基板3の一部に窒素のイオン注入を行なって、引き出し用ドープ層36を形成する。また、活性領域30の一部をドライエッチングにより除去して、溝を形成する。その後、引き出し用ドープ層36の上にNi合金からなるオーミック電極37を形成する。次に、溝の側壁にNi合金からなるショットキー電極35を形成する。

【0060】

図9(a1)～(c3)は、本実施形態のショットキーダイオードと従来のショットキーダイオードについて、バイアスの変化による伝導帯端の形状の変化を

示すエネルギーバンド図である。ここで、図9 (a 1), (b 1), (c 1) は本実施形態のショットキーダイオードのアンドープ層22の伝導帯端を、図9 (a 2), (b 2), (c 2) は本実施形態のショットキーダイオードのn型ドーブ層23の伝導帯端を、図9 (a 3), (b 3), (c 3) は従来のショットキーダイオードのSiC基板の伝導帯端をそれぞれ示す。ただし、従来のショットキーダイオードにおいて、図11に示すようなn-SiC層とn+ SiC層とに跨るショットキー電極を設けることはできず、かつ、全く意味がないので、ここでは、均一な濃度の窒素がドーブされた均一ドーブ層とショットキー電極とが接触し、均一ドーブ層のいずれかの部位にオーミック電極がオーミック接触しているものとする。また、図9 (a 1) ~ (a 3) は、ショットキー電極とオーミック電極との間に電圧を印加しないとき (0 バイアス)、図9 (b 1) ~ (b 3) は、ショットキー電極とオーミック電極との間にショットキー電極の方が高くなるように電圧を印加した場合 (順バイアス)、図9 (c 1) ~ (c 3) は、ショットキー電極とオーミック電極との間にオーミック電極の方が高くなるように電圧を印加した場合 (逆バイアス) の伝導帯端の形状をそれぞれ示している。なお、オーミック電極33と活性領域30との接触状態はバイアスの変化によって本質的に変化するものではないので、図示を省略している。また、本実施形態では、キャリアとして電子が走行するn型半導体層を設けた場合について説明しているので、価電子帯端の形状についても図示を省略している。

【0061】

図9 (a 1) ~ (a 3) に示すように、本実施形態、従来のショットキーダイオード共に、自然状態においては、活性領域のアンドープ層又はn型ドーブ等とショットキー電極との間、均一ドーブ層とショットキー電極との間に、それぞれ高いショットキー障壁 (約1~2 eV) が形成されている。

【0062】

そして、図9 (b 1), (b 2) に示すように、本実施形態のショットキーダイオードに順バイアスが印加されると、活性領域30のポテンシャルが高められる、つまり活性領域30のアンドープ層22及びn型ドーブ層23における伝導帯端のエネルギーレベルが上昇する。このとき、アンドープ層22にも図5 (a

）に示すようなキャリアの分布が生じているので、活性領域 3 0 の n 型ドープ層 2 3 とアンドープ層 2 2 との双方を通じて、容易にショットキー電極 3 5 に電流が流れる。つまり、活性領域 3 0 の n 型ドープ層 2 3 だけでなくアンドープ層 2 2 もキャリア走行領域として機能することになる。このとき、アンドープ層 2 2 には図 5 (a) に示すようなキャリアの分布が生じているものの不純物濃度が薄いので、アンドープ層 2 2 においては不純物散乱が低減される。したがって、活性領域 3 0 全体としての抵抗値を小さく維持することができ、低消費電力、大電流を実現することができる。

【 0 0 6 3 】

一方、図 9 (b 3) に示すように、従来のショットキーダイオードに順バイアスが印加されると、均一ドープ層からショットキー電極に電流が流れる。

【 0 0 6 4 】

また、図 9 (c 1) , (c 2) に示すように、本実施形態のショットキーダイオードに逆バイアスが印加されると、活性領域 3 0 のアンドープ層 2 2 及び n 型ドープ層 2 3 における伝導帯端のエネルギーレベル全体が低くなる。上述のように、耐圧値は、逆バイアス時における空乏層に印加される電界によって規定される。その場合、不純物濃度が低いほど伝導帯端の傾斜が緩やかになるので、不純物濃度が低いほど空乏層幅は当然広くなる。よって、図 9 (c 1) に示すように、アンドープ層 2 2 においては、大きな耐圧値が得られることになる。一方、単に高濃度ドープ層とショットキー電極とが接触している場合、逆バイアスのときの高濃度ドープ層の伝導帯端は、図 9 (c 2) の破線に示すようになり高濃度ドープ層の空乏層幅は極めて狭くなるはずである。ところが、本実施形態においては、n 型ドープ層 2 3 の厚みが 2 nm と極めて薄いので、図 9 (c 2) の実線に示すように、アンドープ層 2 2 からの空乏層が広がって n 型ドープ層 2 3 にまで空乏層が拡大していることから、電子の移動は起こり得ない。

【 0 0 6 5 】

また、活性領域 3 0 全体が空乏化しているときにはアンドープ層 2 2 にはキャリアの分布が生じないので、ショットキー電極 3 5 から引き出し用ドープ層 3 6 に電流が流れるには、n 型ドープ層 2 3 のみを流れなければならない。ところ

が、 n 型ドーブ層 2 3 の厚みが 2 nm と極めて薄いことから、 n 型ドーブ層 2 3 において大きな抵抗を受けることになり、現実には電流が流れない。すなわち、 n 型ドーブ層 2 3 とショットキー電極 3 5 との間は実質的にもオーミック接触することはなく、ショットキー接触が保たれる。しかも、 p 型ドーブ層 2 2、 n 型ドーブ層 2 3 の厚み及び不純物濃度などを調整することにより、厚みの大きい p 型ドーブ層 2 2 とショットキー電極 3 5 との間の空乏層幅によって耐圧値を規定することができる。よって、高い耐圧値を得ることができる。

【0066】

一方、図 9 (c 3) に示すように、従来のショットキーダイオードでは、均一ドーブ層の空乏層幅が均一ドーブ層の不純物濃度に応じて変化するので、均一ドーブ層の不純物濃度を調整することによって抵抗値と耐圧値とを制御することは可能である。しかしながら、第 2 の実施形態で説明したように、抵抗値を下げるために均一ドーブ層の不純物濃度を上げると空乏層幅が狭くなって耐圧値が低下する一方、均一ドーブ層の不純物濃度を低減すると抵抗値が増大するというトレードオフが存在するので、図 1 1 に示す従来のショットキーダイオードでは、パワーデバイスとして望まれる低抵抗性（低消費電力）と高耐圧性とを同時に実現することが困難である。

【0067】

それに対し、本実施形態のショットキーデバイスにおいては、順バイアス状態では、キャリアが n 型ドーブ層 2 3（高濃度ドーブ層）から p 型ドーブ層 2 2（低濃度ドーブ層）に亘って分布し、しかも、 p 型ドーブ層 2 2 における不純物散乱が低減されることから、引き出し用ドーブ層 3 6 からショットキー電極 3 5 に向かって、キャリア（電子）を容易に移動させることができる。一方、逆バイアス状態ではキャリアが p 型ドーブ層 2 2 には存在しないので、ショットキー電極 3 5 から引き出し用ドーブ層 3 6 に極薄の n 型ドーブ層 2 3 のみを経て電子を流すことが困難である。つまり、本実施形態においても、第 2 の実施形態と同様に、順バイアス状態と逆バイアス状態とではキャリアの分布状態が相異なることに着目して、従来のショットキーダイオードにおいて存在していた低抵抗性と高耐圧性というトレードオフを解消することができるのである。

【 0 0 6 8 】

(第 4 の実施形態)

次に、第 1 の実施形態で説明した活性領域 3 0 を利用した M E S F E T に関する第 4 の実施形態について説明する。図 1 0 は、第 4 の実施形態に係るパワー半導体デバイスである M E S F E T の概略的な構造を示す断面図である。

【 0 0 6 9 】

同図に示すように、(0 0 0 1) オフ面を主面とする n 型の 6 H - S i C 基板である基板 3 の主面上には、上記第 1 の実施形態で説明した方法により形成されたアンドープ層 2 2 (低濃度ドーピング層) と n 型ドーピング層 2 3 (高濃度ドーピング層) とを交互に 2 0 層ずつ積層したチャネル層として機能する活性領域 3 0 が設けられている。ここで、基板 3 の厚さは約 1 0 0 μm で、基板 3 には不純物がドーピングされておらずほぼ半絶縁性状態となっている。n 型ドーピング層 2 3 の厚さは約 1 n m で、n 型ドーピング層 2 3 中の窒素のピーク濃度は $1 \times 1 0^{18} \text{atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ である。アンドープ層 2 2 の厚さは約 1 0 n m で、アンドープ層 2 2 中の窒素濃度は約 $1 \times 1 0^{15} \text{atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$ である。

【 0 0 7 0 】

ここで、本実施形態においては、活性領域 3 0 の最上部のアンドープ層 2 2 の上に、アンドープ層 2 2 とショットキー接触する N i 合金からなるショットキー電極であるゲート電極 3 8 と、ゲート電極 3 8 を挟んで互いに対向する N i 合金からなるオーミック電極であるソース電極 3 9 a 及びドレイン電極 3 9 b とが設けられている。そして、M E S F E T のチャネル層として機能する活性領域 3 0 のトータル厚みは 2 2 0 n m である。また、ゲート電極 3 8 のゲート長は約 1 μm である。

【 0 0 7 1 】

図 1 0 に示す M E S F E T の構造は、以下の手順により形成される。まず、半絶縁性の S i C 基板である基板 3 を図 1 に示す結晶装置内に設置し、第 1 の実施形態で説明した C V D を行なって、基板 3 の上にアンドープ層 2 2 と n 型ドーピング層 2 3 とを交互にエピタキシャル成長させて、活性領域 3 0 を形成する。次に、基板上に N i 合金からなるソース電極 3 9 a, ドレイン電極 3 9 b を形成する。

このときには、ソース電極 3 9 a, ドレイン電極 3 9 b と活性領域 3 0 の最上部のアンドープ層 2 2 とはショットキー接触しているが、その後に、1 0 0 0 °C で 3 分間の熱処理を施すことにより、ソース電極 3 9 a, ドレイン電極 3 9 b と活性領域 3 0 の最上部のアンドープ層 2 2 とをオーミック接触構造に変える。次に、基板上に N i 合金からなるゲート電極 3 8 を形成し、その後上述のような熱処理を行わずに、ゲート電極 3 8 と活性領域 3 0 の最上部のアンドープ層 2 2 とをショットキー接触している状態に保持する。

【0 0 7 2】

ここで、比較例として、半絶縁性の S i C 基板の上に均一の濃度 (1×10^{17} atoms \cdot cm $^{-3}$) に窒素がドーパされた均一ドーパ層を設け、この均一ドーパ層の上に本実施形態と同様のゲート電極、ソース電極及びドレイン電極を設けて、均一ドーパ層をチャネル層とする M E S F E T を作成した。

【0 0 7 3】

本実施形態においては、ゲート電極 3 8 に電圧が印加されていなくて、ドレイン電極 3 9 b に正の電圧が印加されると、活性領域 3 0 内のドレイン電極 3 9 b 直下の領域と、ゲート電極 3 8 直下の領域との間には、第 3 の実施形態における逆バイアスと同じポテンシャル差が生じるが、空乏層幅は小さい。一方、ソース電極 3 9 a 直下の領域と、ゲート電極 3 8 直下の領域との間にはポテンシャル差はない。その結果、活性領域 3 0 中のアンドープ層 2 2 においては図 9 (b 1) に示すように、活性領域 3 0 中の n 型ドーパ層 2 3 においては図 9 (b 2) に示すように、それぞれキャリア (電子) が発生して、第 3 の実施形態と同様に、活性領域 3 0 内をソース電極 3 9 a 直下の領域からドレイン領域 3 9 b 直下の領域に向かって、電子が移動する。その際、電子がアンドープ層 2 2 及び n 型ドーパ層 2 3 の双方を流れるので、第 3 の実施形態と同じ作用によって、高い電子移動度と低抵抗とが得られる。

【0 0 7 4】

次に、ゲート電極 3 8 に負の電圧が印加されると、活性領域 3 0 内のゲート電極 3 8 直下の領域と、ドレイン電極 3 9 b 直下の領域との間には、第 3 の実施形態における逆バイアスと同様に大きなポテンシャル差が生じる。一方、ソース電

極 3 9 a 直下の領域とゲート電極 3 8 の直下の領域においても、第 3 の実施形態における逆バイアスと同じポテンシャル差が生じる。言い換えると、活性領域 3 0 内のゲート電極 3 8 直下の領域に空乏層が大きく広がることになる。よって、上述の第 3 の実施形態と同じ作用により、薄い n 型ドープ層 2 3 のみを電子が走行するのが困難となるので、ソース・ドレイン間における高耐圧が得られることになる。

【 0 0 7 5 】

ここで、本実施形態の MESFET の性能についての評価結果と、本実施形態の MESFET と従来の MESFET との性能の比較とについて説明する。

【 0 0 7 6 】

まず、ゲート・ソース間の耐圧性について両者を比較した。本実施形態におけるアンドープ層と n 型ドープ層とを 2 0 周期交互に積層して形成された活性領域 3 0 をチャネル層とする MESFET では、絶縁耐圧は 1 2 0 V となり、従来の MESFET の 4 倍の耐圧値を有していた。

【 0 0 7 7 】

次に、本実施形態の MESFET について、ドレイン電流とドレイン電圧との関係のゲート電圧依存性 (I-V 特性) を調べた。ソース電極 3 9 a とドレイン電極 3 9 b との間に一定電圧を印加し、ゲート電極 3 8 に電圧を印加することにより、ゲート電極 3 8 に印加する電圧に応じてソース・ドレイン間の電流が変調され、スイッチング動作が得られた。この時、ドレイン電圧が 1 4 0 V 以上であっても、ブレークダウンなしに安定なドレイン電流が得られた。

【 0 0 7 8 】

図 1 2 は、本実施形態の MESFET について、ドレイン電流とドレイン電圧との関係のゲート電圧依存性 (I-V 特性) を測定した結果を示す図である。同図において、横軸はドレイン間電圧 V_{ds} (V) を表し、縦軸はドレイン電流 I_{ds} (A) を表し、ゲート電圧 V_g をパラメータとしている。

【 0 0 7 9 】

さらに、本実施形態と従来の MESFET について、しきい値電圧付近の相互コンダクタンスを測定した。その結果、上述のような活性領域 3 0 をチャネル層

として用いた本実施形態のMESFETの相互コンダクタンスは、均一ドープ層をチャンネル層として用いた従来のMESFETに比べて約2倍近く高くなっていることが分かった。これは、本実施形態のMESFETにおける電子移動度が上述のように高くなることに起因するものである。

【0080】

以上の結果から、本実施形態のMESFETにおいては、低消費電力、高耐圧、高利得という効果を発揮することができる。

【0081】

(その他の実施形態)

上記第1～第4の実施形態においては、アンドープ層22（低濃度ドープ層）とn型ドープ層23（高濃度ドープ層）とを多数積層した活性領域30を設けたが、活性領域内に低濃度ドープ層と高濃度ドープ層とが1層ずつしか設けられていない構造であってもよい。

【0082】

上記第2～第4の実施形態においては、高濃度ドープ層として窒素を用いてn型のドープ層を形成したが、低濃度ドープ層、高濃度ドープ層のいずれにおいても、n型の伝導性を示すドーパントとして他の元素（例えばリン（P），砒素（As）など）を含むドーピングガスを用いても差し支えない。

【0083】

また、上記第2の～第4の実施形態においては、高濃度ドープ層としてn型のドープ層を形成したが、低濃度ドープ層、高濃度ドープ層のいずれにおいても、p型の伝導性を生じるボロン（B），アルミニウム（Al），ガリウム（Ga）等の原子を含むドーピングガスを用いれば、各遷移領域で極めて急峻な濃度分布をもつp型のドープ層が形成されることはいうまでもない。

【0084】

また、上記第2～第4の実施形態においては、炭化珪素基板（SiC基板）の代わりに、他の材料からなる基板を用いて、その上に半導体層（低濃度ドープ層と高濃度ドープ層）をエピタキシャル成長させた活性領域を設けてもよい。特に、GaAs，GaNなどの基板は、イントリンシック状態でいわゆる半絶縁性材

料と呼ばれるほどバンドギャップが広いことから、上記第2～第4の実施形態における活性領域30を形成することによって高耐圧のデバイスを形成しうる利点がある。

【0085】

さらに、上記第1～第4の実施形態においては、活性領域30中のアンドープ層22（低濃度ドープ層＝第1の半導体層）とn型ドープ層23（高濃度ドープ層＝第2の半導体層）とを同じ材料であるSiCによって構成したが、本発明の第1半導体層と第2の半導体層とは必ずしも互いに共通の材料によって構成する必要はない。ただし、両者を互いに共通の材料によって構成することにより、2つの層の間のポテンシャル障壁の傾斜がなめらかになるので、キャリアを活性領域全体に亘って分布させることが容易となる。

【0086】

さらに、上記第2～第4の実施形態において、CVD法に代えて、スパッタリング法、蒸着法、MBE法などの他の方法を用いて、低濃度ドープ層（アンドープ層を含む）と、それよりも厚みが小さく、量子効果による低濃度ドープ層へのキャリアの浸みだしが可能な程度に厚みの薄い高濃度ドープ層とを積層して、これを活性領域としてもよい。

【0087】

その際、低濃度ドープ層と高濃度ドープ層との不純物濃度の値は上記各実施形態に示す値に限定されるものではない。すなわち、高濃度ドープ層と低濃度ドープ層との不純物濃度の差が所定値（例えば1桁程度）以上であれば、本発明の効果を得ることができる。

【0088】

なお、MISFETにおいても、ショットキーダイオード、MESFETと同様に、低抵抗化と高耐圧化についてのトレードオフという不具合があるが、上記第2の実施形態をMISFETに応用することにより、上記第2の実施形態と同様の効果を発揮することができる。

【0089】

【発明の効果】

本発明の半導体装置によれば、基板上に、キャリア走行領域として機能する第1の半導体層と、高濃度のキャリア用不純物を含み量子効果による第1の半導体層へのキャリアの浸みだしが可能な第2の半導体層とを積層してなる活性領域を設けたので、低抵抗化と高耐圧化とを同時に実現することが可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明の各実施形態において用いられる薄膜形成用の結晶成長装置の構造を概略的に示す図である。

【図2】

パルス幅を変化させたときのn型ドーパ層のピークキャリア濃度と、キャリア移動度との変化を示す図である。

【図3】

(a)～(c)は、本発明の第1の実施形態の半導体膜の成長方法を示す断面図である。

【図4】

第1の実施形態において形成された活性領域の深さ方向のドーパント濃度分布を示す図である。

【図5】

(a)，(b)は、第1の実施形態における活性領域の深さ方向における窒素の濃度プロファイルとキャリア分布との関係を模式的に示す図、及び活性領域の深さ方向に沿った伝導帯端の形状を示す部分バンド図である。

【図6】

図6は、本発明の第2の実施形態に係るショットキーダイオードの概略的な構造を示す断面図である。

【図7】

(a1)～(c2)は、第2の実施形態のショットキーダイオードと従来のショットキーダイオードについて、バイアスの変化による伝導帯端の形状の変化を示すエネルギーバンド図である。

【図8】

本発明の第 3 の実施形態に係るショットキーダイオードの概略的な構造を示す断面図である。

【図 9】

(a 1) ~ (c 3) は、本発明の第 3 の実施形態のショットキーダイオードと従来のショットキーダイオードについて、バイアスの変化による伝導帯端の形状の変化を示すエネルギーバンド図である。

【図 1 0】

本発明の第 4 の実施形態に係る M E S F E T の概略的な構造を示す断面図である。

【図 1 1】

従来の炭化珪素 (S i C) を用いたショットキーダイオードの概略的な構造を示す断面図である。

【図 1 2】

第 4 の実施形態の M E S F E T の I - V 特性の測定結果を示す図である。

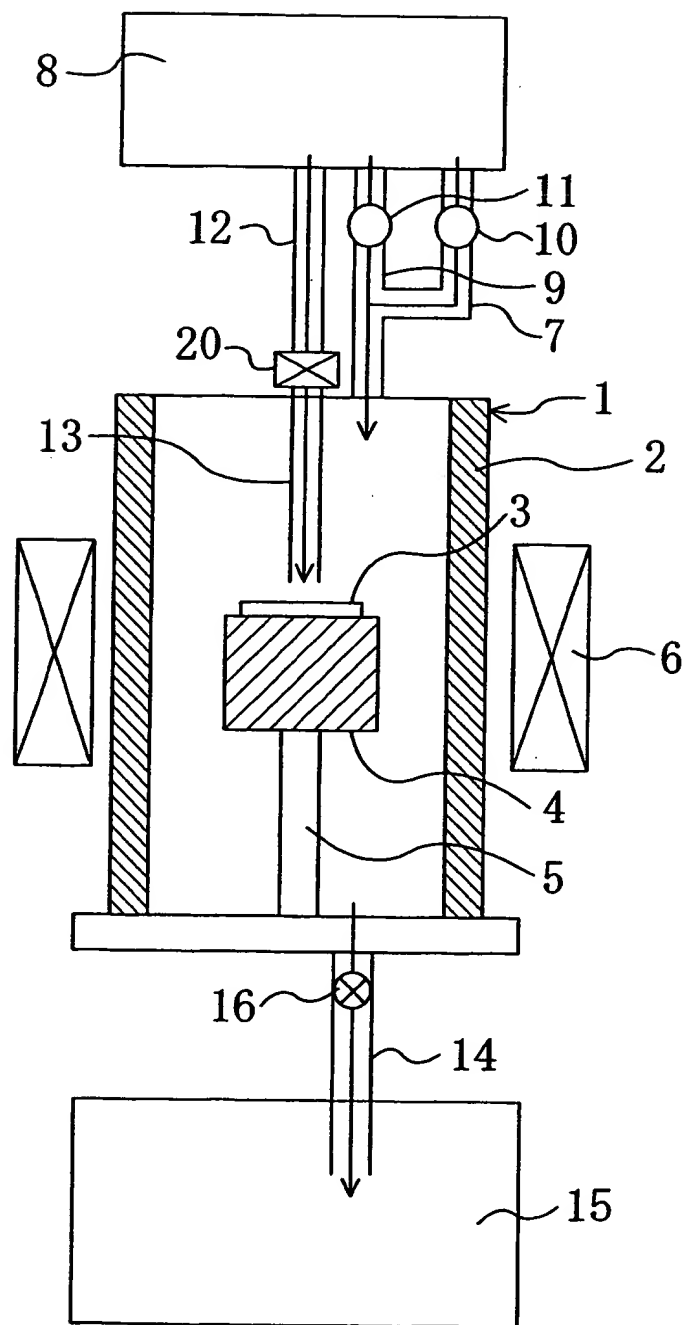
【符号の説明】

- 1 パルスバルブ
- 2 チャンバー
- 3 基板
- 4 サセプタ
- 5 支持軸
- 6 コイル
- 7 原料ガス供給管
- 8 ガス供給システム
- 9 希釈ガス供給管
- 1 0 流量計
- 1 1 流量計
- 1 2 添加ガス供給管
- 1 3 ガス導入管
- 1 4 排気管

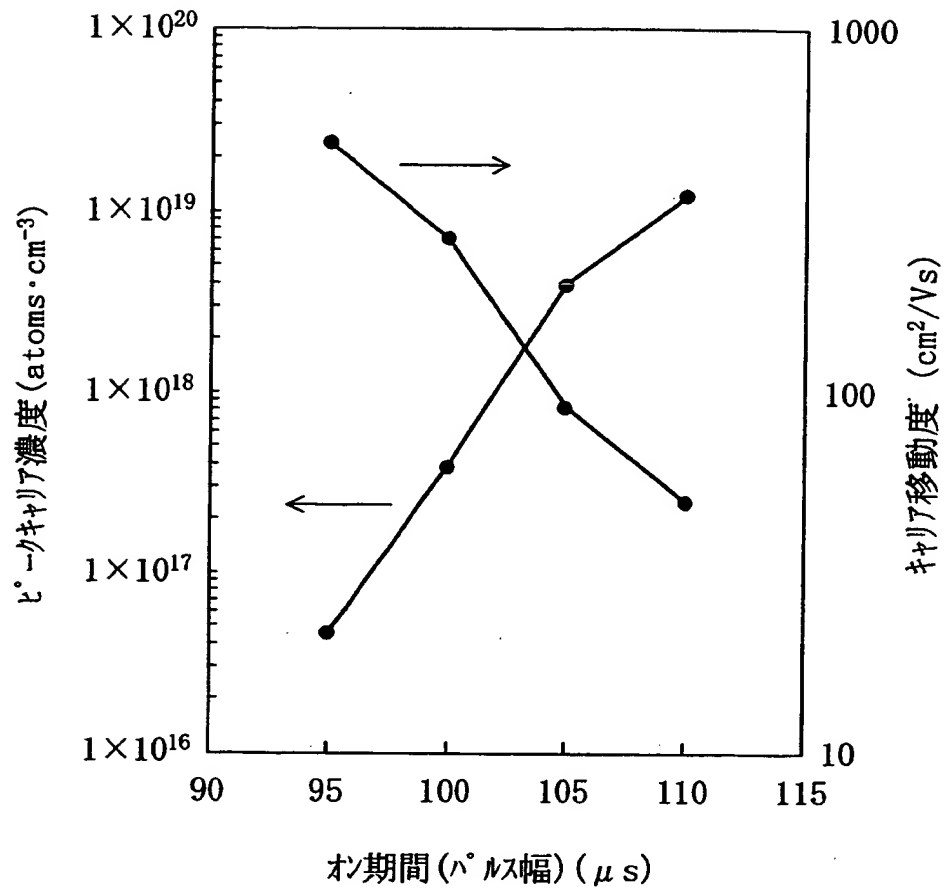
- 1 5 ガス排気システム
- 1 6 圧力調整用バルブ
- 2 0 パルスバルブ
- 2 2 アンドープ層
- 2 3 n型ドーブ層
- 3 0 活性領域
- 3 1 ガードリング
- 3 2 ショットキー電極
- 3 3 オーミック電極
- 3 5 ショットキー電極
- 3 6 引き出し用ドーブ層
- 3 7 オーミック電極
- 3 8 ゲート電極
- 3 9 a ソース電極
- 3 9 b ドレイン電極

【書類名】 図面

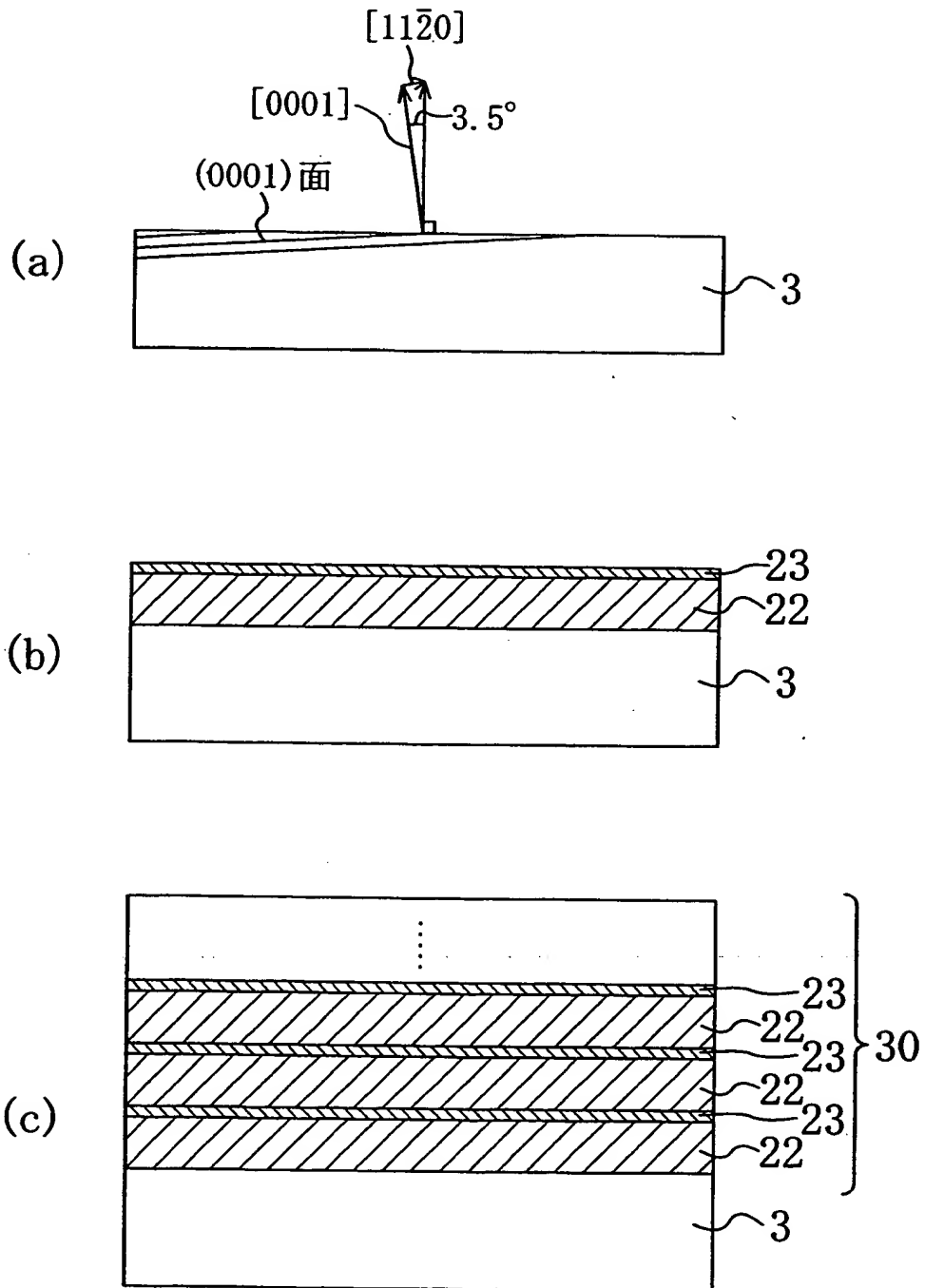
【図1】



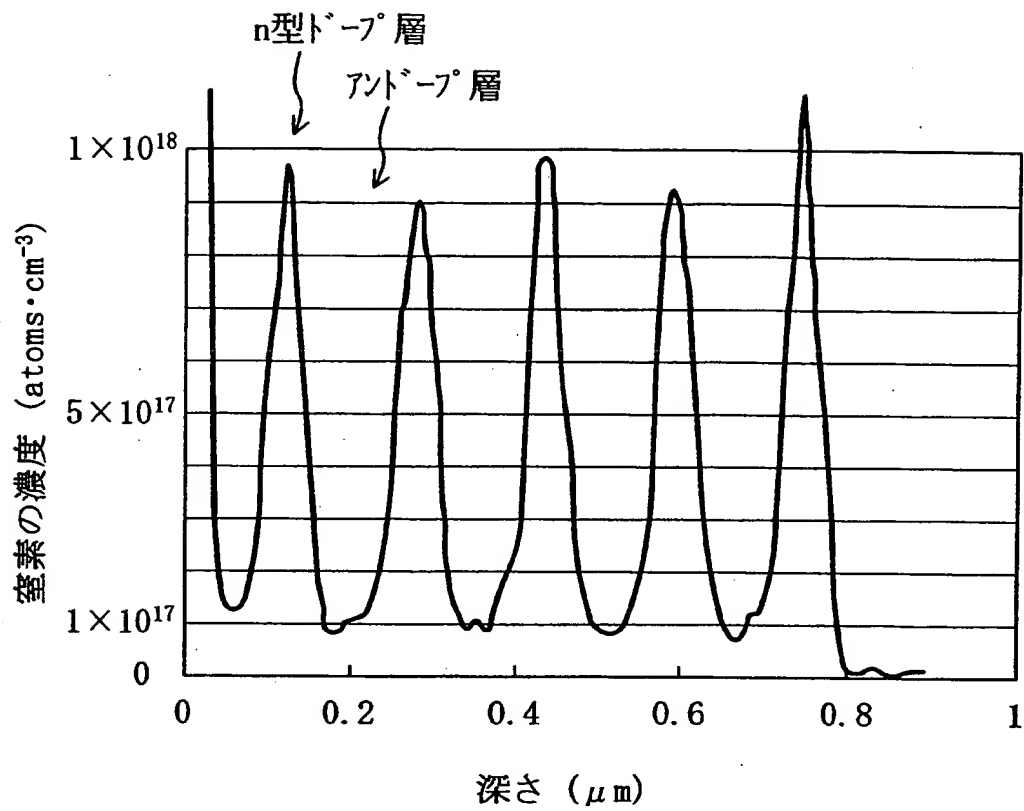
【図 2】



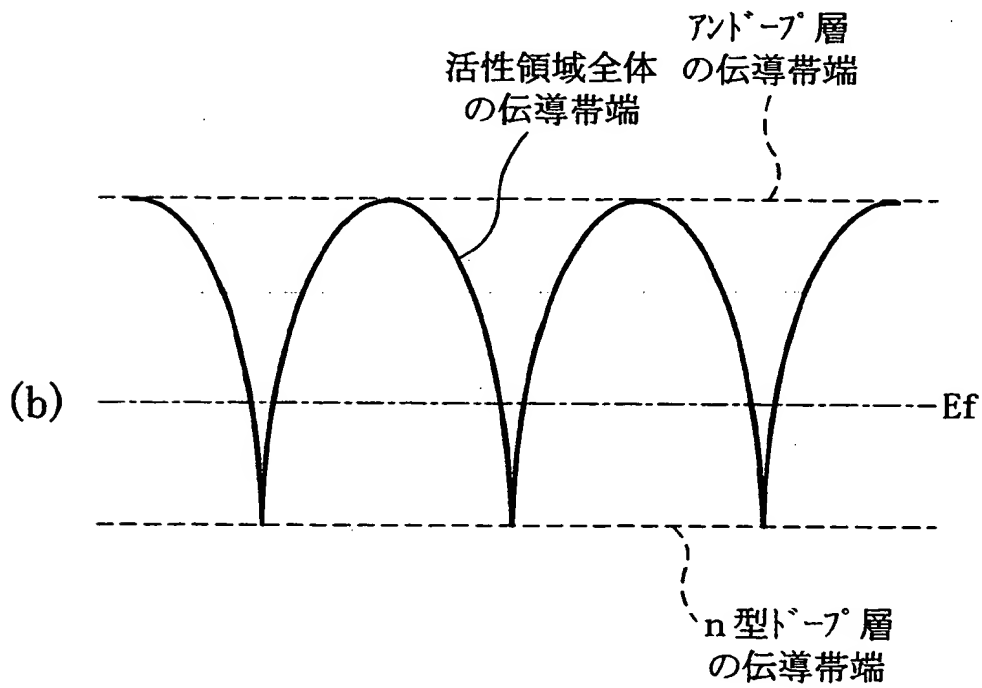
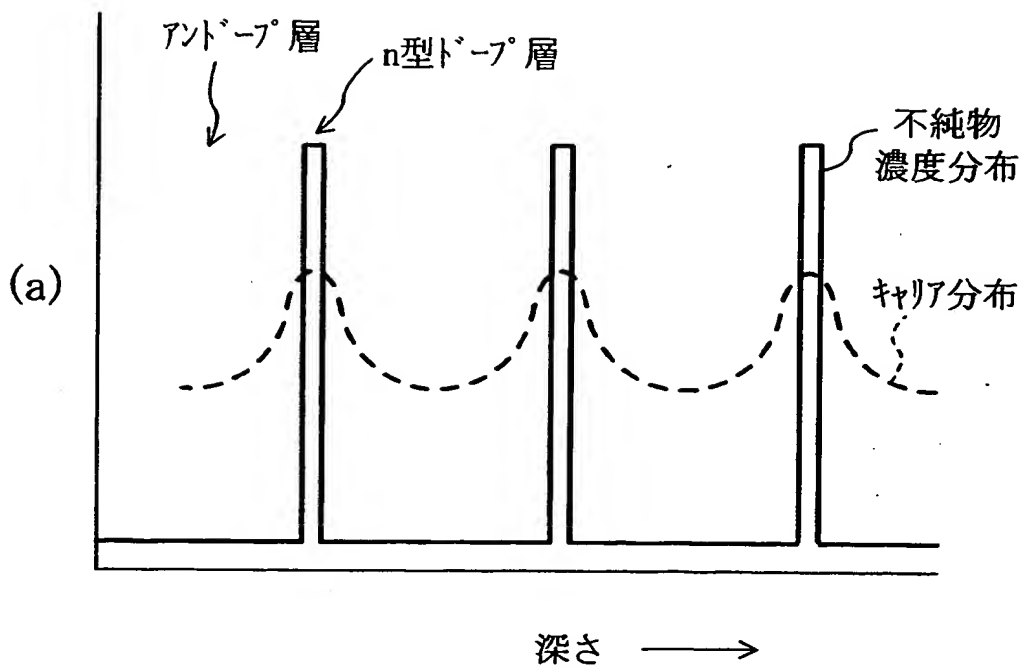
【図 3】



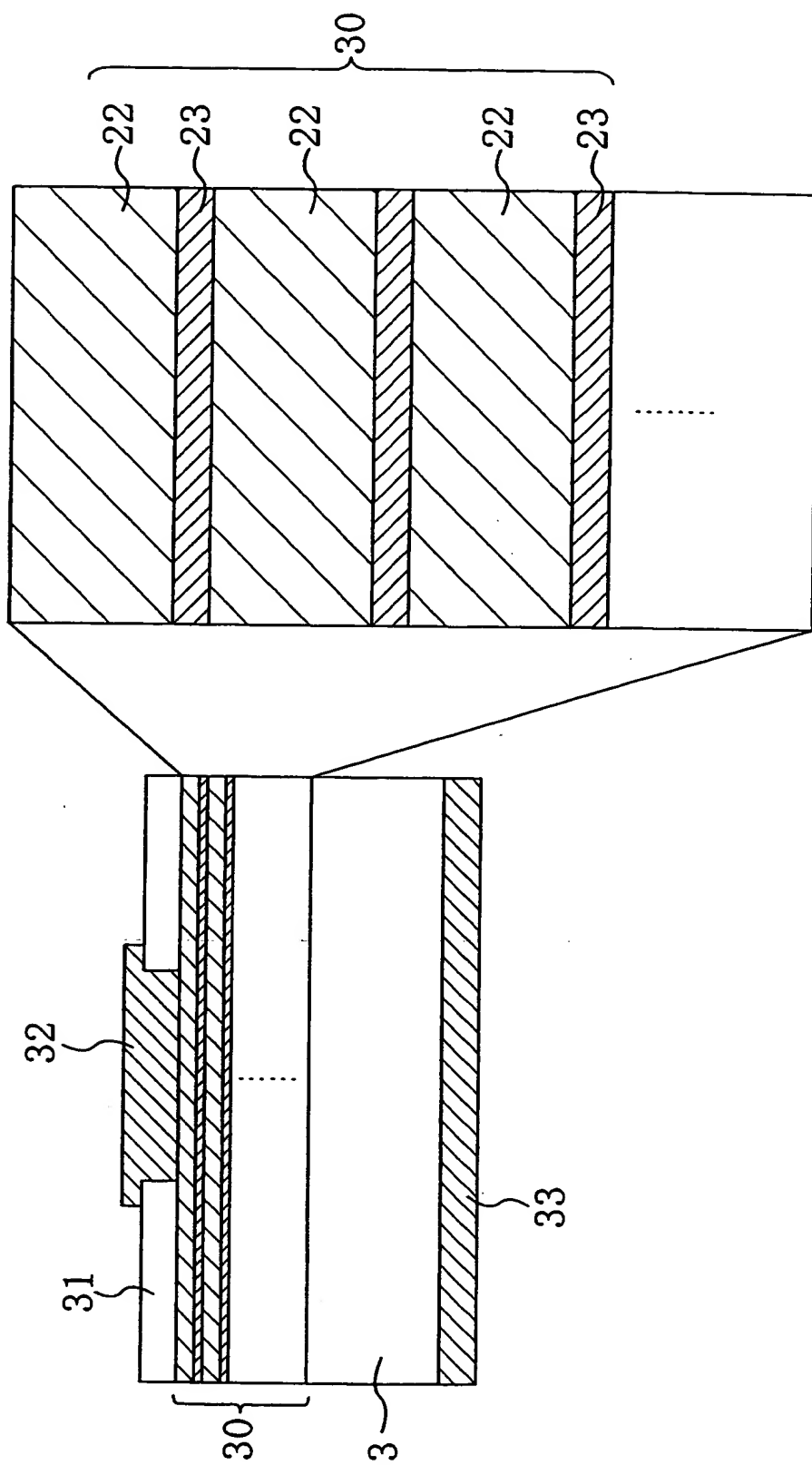
【図 4】



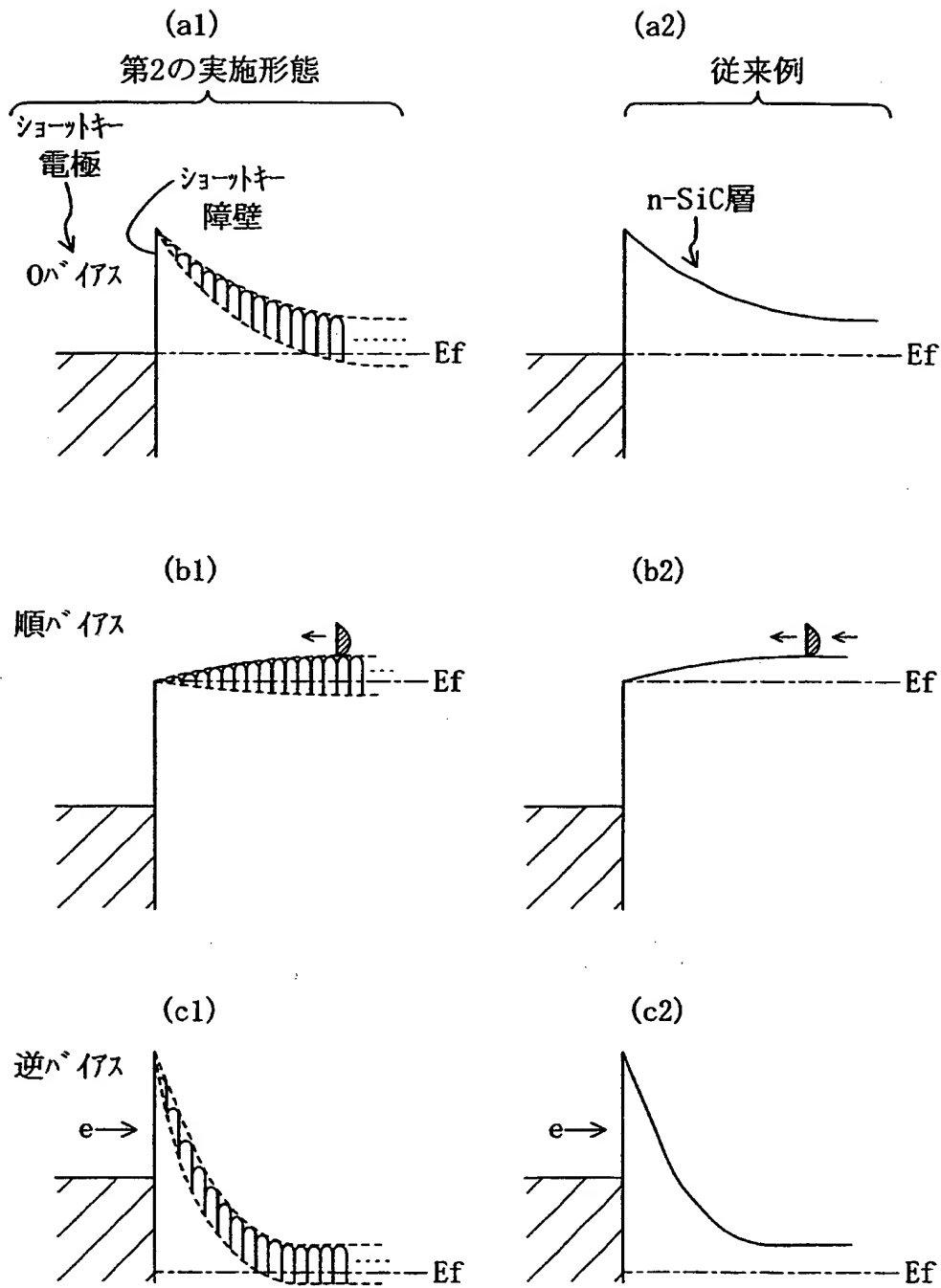
【図5】



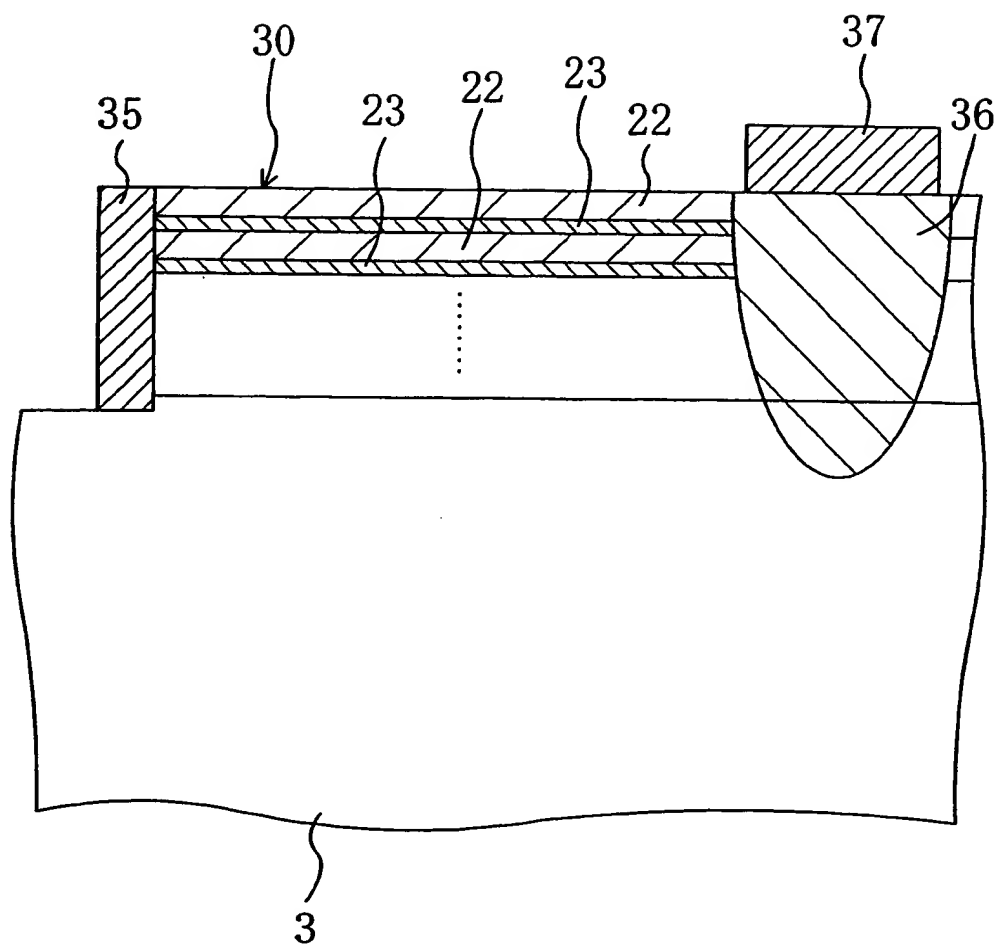
【図 6】



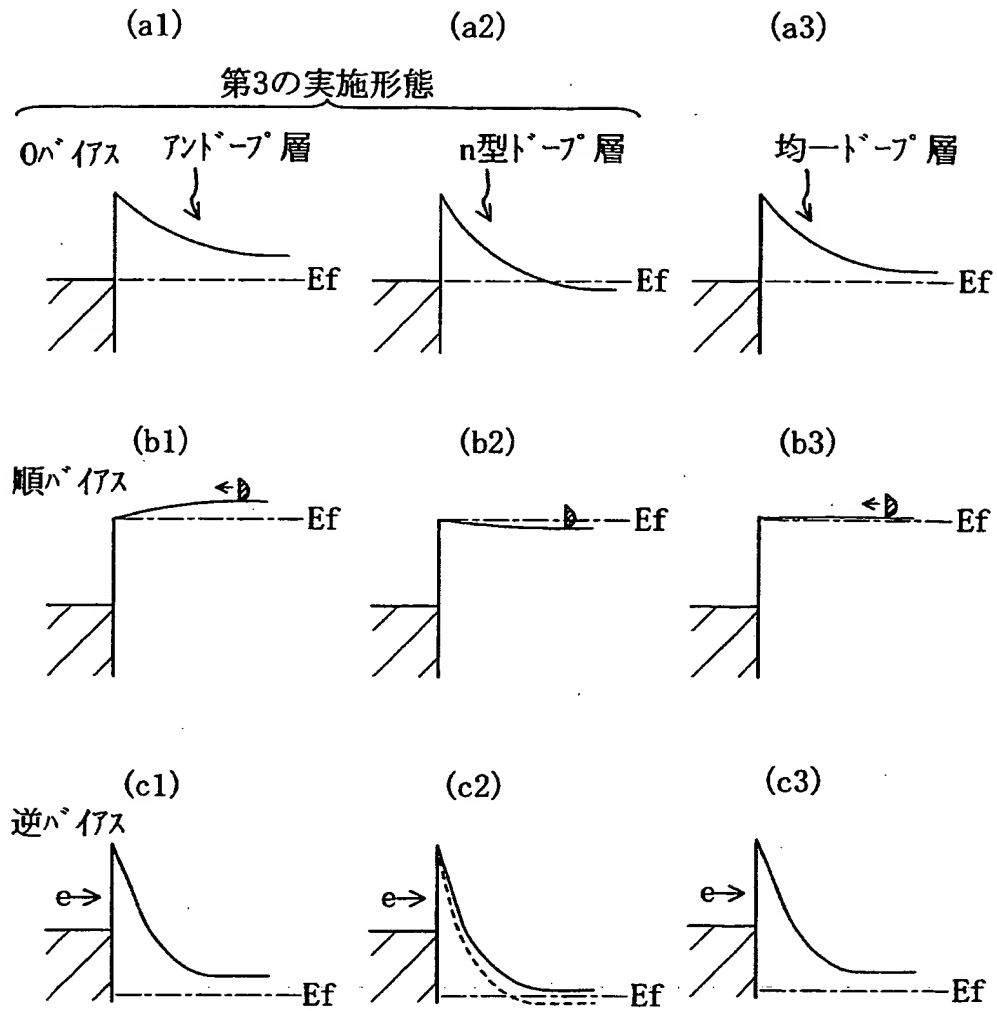
【図 7】



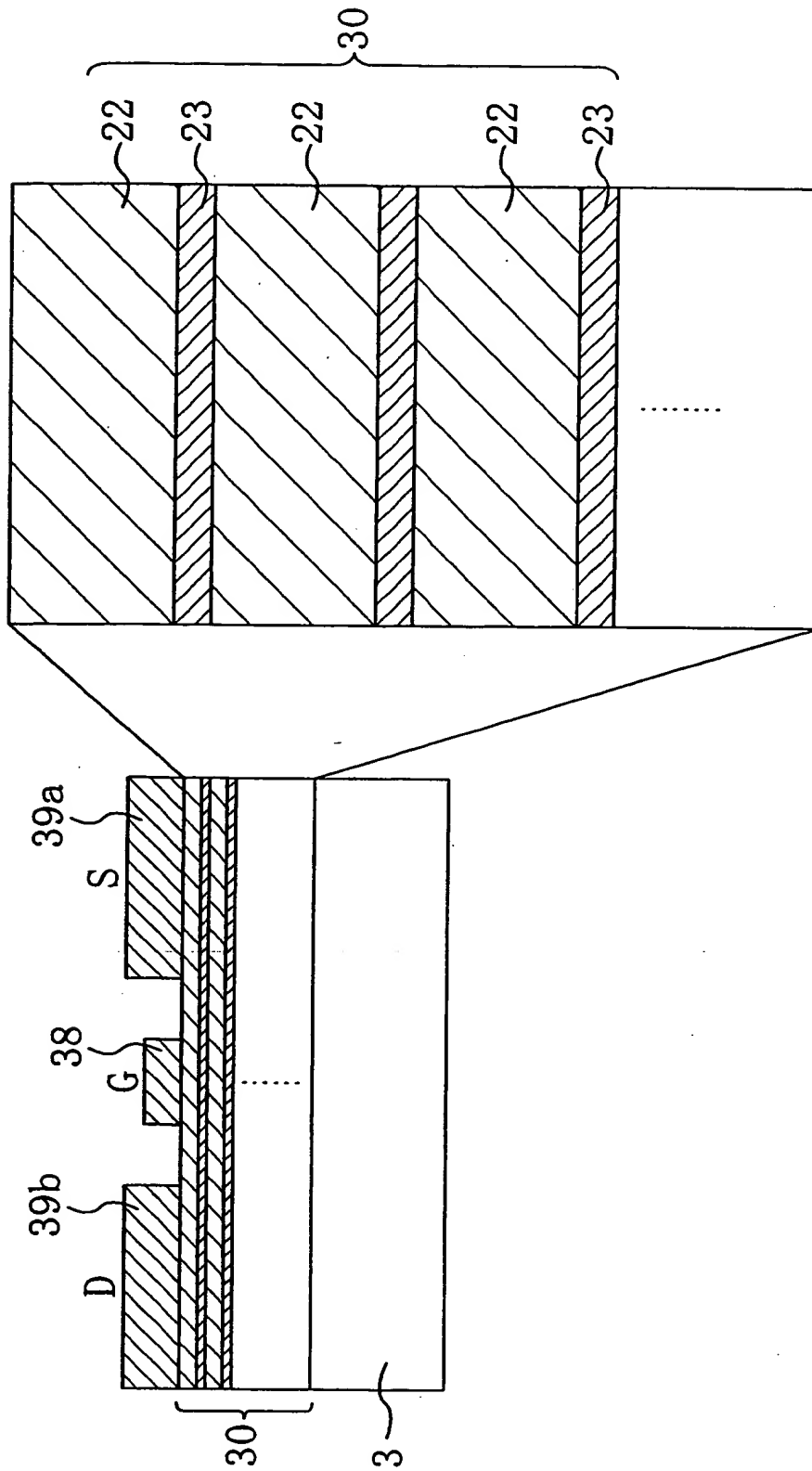
【図8】



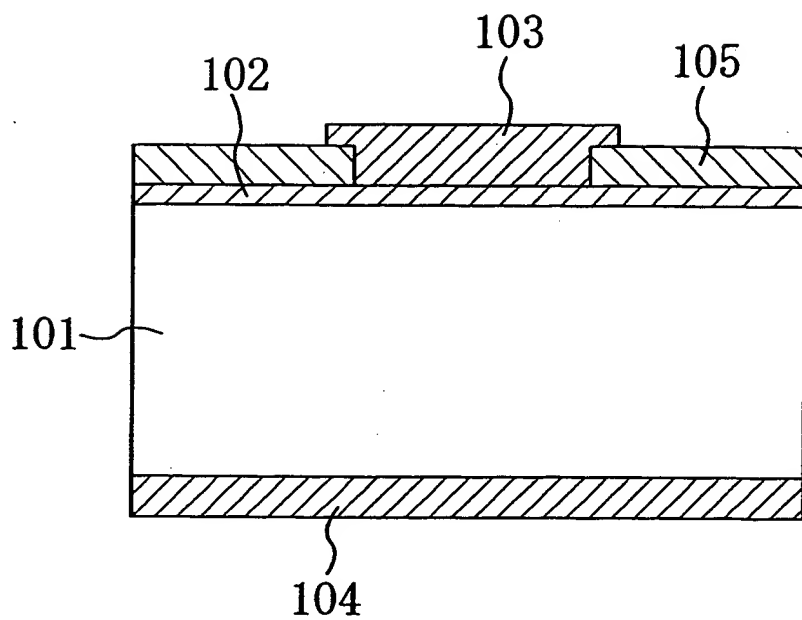
【図9】



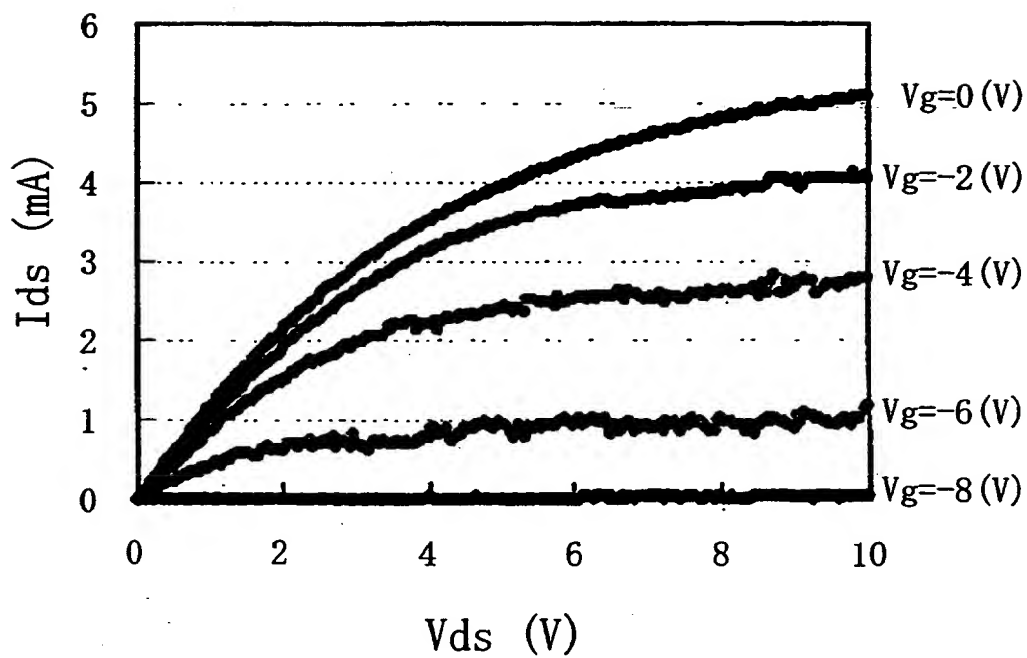
【図 1 0】



【図 1 1】



【図 1 2】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 低抵抗化と高耐圧化とが可能なパワーデバイスに最適な半導体層の構造を実現する。

【解決手段】 SiC, GaN, GaAsなどの基板3の上に、厚みが例えば100nm程度の厚いアンドープ層22と、厚みが量子効果を発揮する程度に薄い（例えば5nm程度）n型ドープ層23とを交互に積層し、活性領域30を形成する。n型ドープ層23の量子効果によって生じるサブバンドからキャリアをアンドープ層22にまで分布させる。不純物が少ないアンドープ層22においては不純物散乱が低減されるので、高いキャリア移動度が得られるとともに、活性領域30全体が空乏化したときには、活性領域30からキャリアがなくなることを利用して、アンドープ層22による大きな耐圧値を得ることができる。

【選択図】 図3

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000005821]

1. 変更年月日 1990年 8月28日

[変更理由] 新規登録

住 所 大阪府門真市大字門真1006番地

氏 名 松下電器産業株式会社